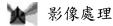


4. 色彩科學概要

4.1 色彩成因

4. 色彩科學概要

- 4.2 色彩表示
- 4.3 色彩模式
- 4.4 色彩轉換
- 4.5 色彩再製
- 4.6 彩色螢幕
- 4.7 半色調列印



4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

2

- ♥ 從英國數學家湯姆士楊 (Thomas Young) 在1807年 確認了眼睛的紅藍綠感色功能算起,歷經德國物理 學家赫曼賀姆赫茲 (Hermann von Helmholtz)、德國 數學家赫曼葛拉思蒙 (Hermann Grassmann, 1853)、 英國數學物理學家詹姆士克拉克麥斯威爾 (James Clerk Maxwell, 1861) 等人的理論發展, 色彩科學 (color science) 的研究已有 200 年的歷史。
- ✿ 在色彩理論上,我們都以三個變數來表示三個基本 顏色,每一種顏色都是由這三種基本顏色所合成的
- 在色彩科學的研究歷史上,有許多基本顏色組被提 出;這些色彩表示式 (representation) 描述了人類在 色彩科學研究上的軌跡;從這個軌跡我們可以了解 人類在色彩上的需求及努力。

◆ 基本上,研究色彩科學有三個方向:

4. 色彩科學概要

- i. 色彩的成因 (cause), 也就是造成色彩的物理 及化學現象,
- ii. 色彩視覺的生理 (psychology) 與精神物理 (psychophysics) 特性,及
- iii. 色彩度量學 (colorimetry), 也就是量化色彩的 學科。研究色彩再製;例如,電視機、投影機、 印表機的製造,都一定要做色彩度量。



▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

4.1 色彩成因

● 自然界有什麼因素會造成不同波長的電磁波 呢?Kurt Nassau 在他的書上列舉了5類共 15 項色彩成因 (color cause)

類 別	成 因
一面么临炕	1. 白熱化;物體加熱,顏色會隨著溫度上升而改變。
1. 震動與簡 單的激發	2. 氣體激發;氣體粒子電位能量改變而顏色改變。
平的放牧	3. 震動與旋轉;分子結構的化學鏈長度或夾角變化。
	4. 金屬複合物轉換;金屬混合造成電子軌道上有不
. 混合金	成對的激發電子而造成顏色。
屬轉換	5. 金屬參雜物的轉換;金屬參雜其他少量金屬物質
	而造成顏色的變化。

Ⅲ. 分子結 構轉換

- 6. 有機複合物;有機分子吸收光線變化電子能階, 而造就色彩。
 - 7. 電荷轉移;原子價間的電荷轉換,藉由吸收光能 量,而造就色彩。
- IV. 能量頻 帶變遷
- 8. 金屬;超越費米表面的自由電子輻射。
- 9. 純半導體;電子藉由熱震動吸收能量變色。
- 10. 参雜或激化的半導體;半導體藉由參雜其他物質 以激發額外的電子。
- 11. 色彩中心;藉由輻射或其他技術使電子游離來形 成電洞或電子吸收光線,製造色彩。
- V. 幾何及 物理光 學
- 12. 折射;不同介質間的折射。
- 13. 散射;光線穿越微粒間所顯現的光線散射現象。
- 14. 干涉;相同方向相同波長之光線間的建設性增 強或破壞性削減的光波變化。
- 15. 繞射;光線在障礙物邊緣形成的擴散現象。



▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

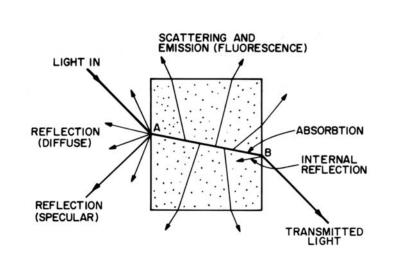
6

● 色彩的物理成因 (Physical factors) 折射 (Refraction)

散射 (Scattering; e.g., blue sky, sunset, blue eye, sugar, salt, cloud, snow)

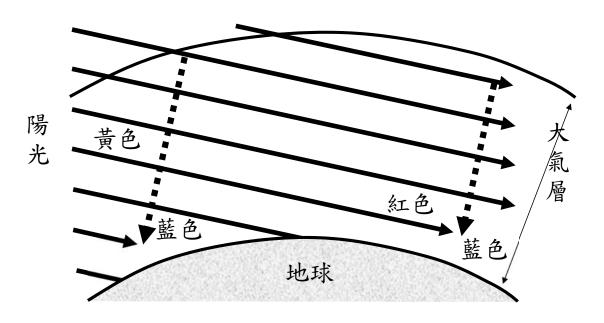
千涉 (Interference; e.g., soap bubbles, peacocks, butterfly, opals (貓眼石))

散亂 (Dispersion; e.g., diamond, rainbow) ...



*

散射 Scattering (blue sky and sunset)



陽光在大氣層 (atmosphere) 中的散射形成了藍天及紅太陽 (red sunrise or sunset colors) 的現象。



8 degree

影像處理

4. 色彩科學概要

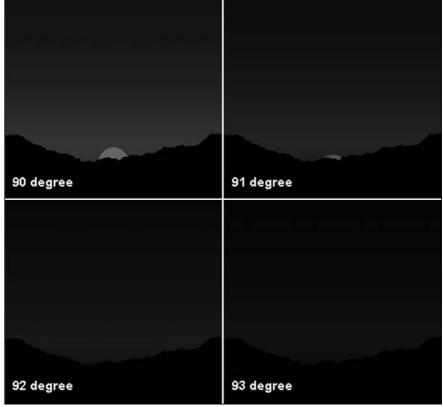
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

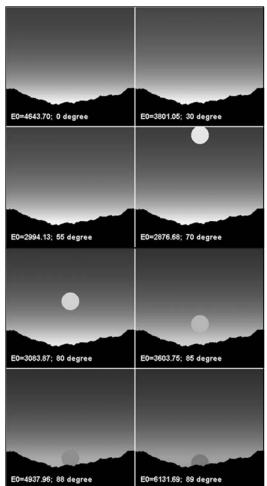
8

0 degree 30 degree 55 degree 70 degree 80 degree

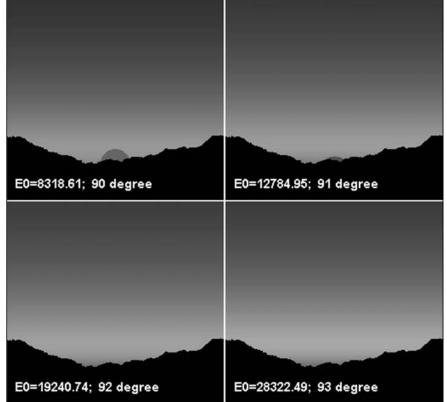
89 degree

合成的天空與太陽顏色。





以固定的亮度 (varied irradiance) 合成的天空與太陽顏色。



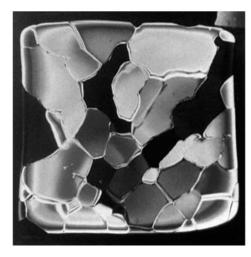
影像處理

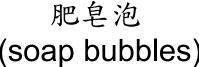
4. 色彩科學概要

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 10

● 干涉 (Interference)





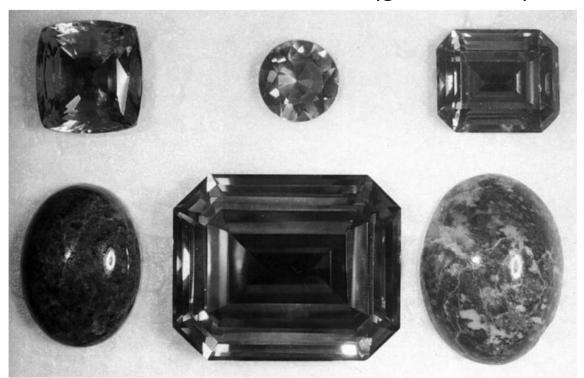




蝴蝶翼 蝴蝶翼滴丙酮

(soap bubbles) (Wang of butterfly) (acetone)

● 6 種不同色彩成因的藍色寶石 (gemstones)



Above: Maxixe-type beryl, blue spinel, spinel "doublet" Below: Shattuckite, blue sapphire, lazuli.

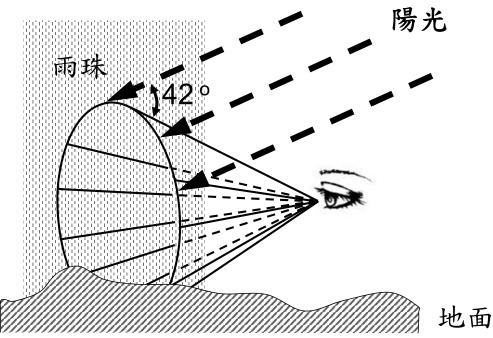
影

影像處理

4. 色彩科學概要

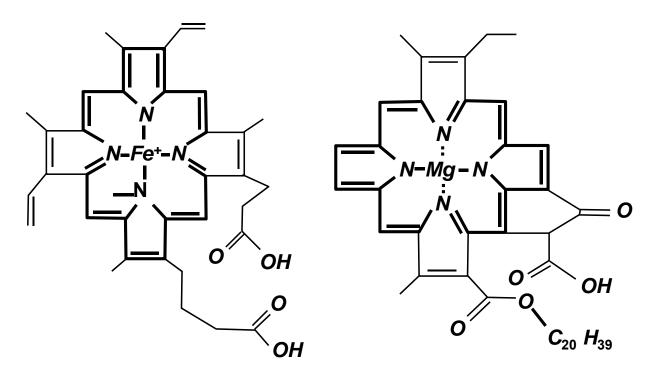
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 12

♣ 散亂 (dispersion) - 彩虹 (rainbow) 的原理



陽光照射到小水珠後會產生光波散亂;但只有在視線與陽光射線呈 42° 角時,才可看到散亂出來的各種波長顏色。

● 有機複合物之分子結構轉換的色彩



血紅素的分子結構

葉綠素的分子結構



影像處理

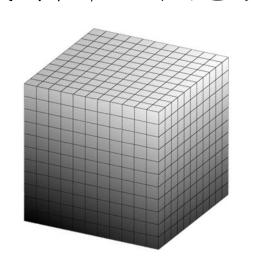
4. 色彩科學概要

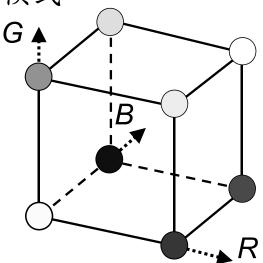
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 1

4.2 色彩表示

◆ 在色彩科學中,我們都以色彩模式 (color model) 來表示所有可能的顏色。色彩模式又稱為 色彩空間 (color space) 或 色彩表示式 (color representation); *RGB* 就是一

個我們最常聽到的色彩模式。

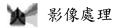




- ♣ RGB 色彩模式有負成份的問題,所以我們通常 都用 XYZ 色彩模式來代表解說色彩模式的定義 。XYZ和 RGB 是一樣的三維直角座標系統。
- 三維表示式中的 X, Y, Z 稱為 三激值 (tristimulus values), 三激值是表示合成 某一種特定顏色時,需要三種基本顏色的各別份量 (amount)。另外還有一種 X, Y, Z 三色係數 (trichromatic coefficients)表示式;

$$X = \frac{X}{X + Y + Z}$$
 $Y = \frac{Y}{X + Y + Z}$ $Z = \frac{Z}{X + Y + Z}$

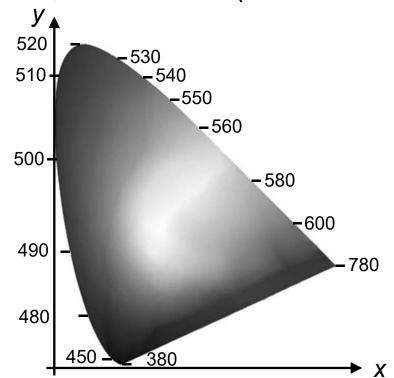
所以 x+y+z=1.



4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 16

★ X, Y, Z 三個變數總共才只有兩個自由度 (degree of freedom),表示式只是二維的;這種二維的表示式是一個平面"色度圖" (chromaticity diagram)。



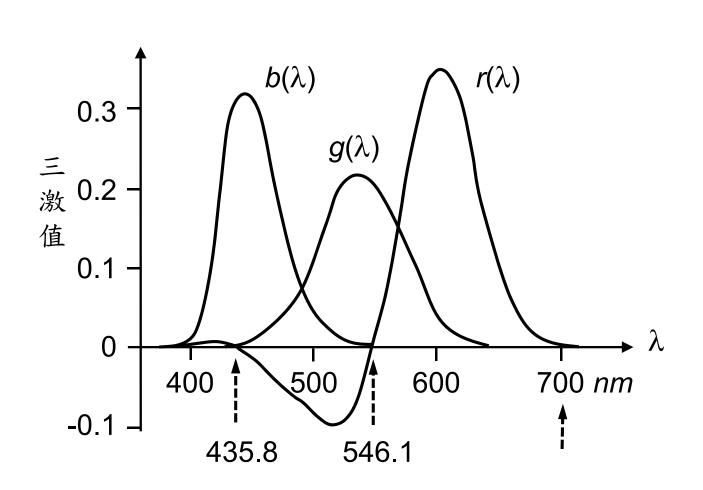
4.2.1 色彩合成

- ★ 古典色彩科學告訴我們,任何顏色只要用三種基本顏色就可以混合出,所以現在所用的色彩空間都三維的。但是實際上,每一種色彩模式都有一些缺憾;都會有一些光譜上的顏色合不出來。
- 國際照明委員會 (CIE) 在1931年所制定的 RGB 色彩模式,並不能把所有可見光頻譜的飽和色都 合成出來,如下頁圖所示。圖中有三條曲線,個 別代表紅藍綠三種基本顏色組成各種可見光頻譜 飽和色所需的份量。其中波長介於 435.8 到 546.1 奈米的紅色成份是負的 (合成不出來)。

▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 18



4.2.2 色彩模式與色度圖的關係

- 色彩的表示通常以大寫字母表示三維色彩空間, 而以小寫字母表示二維色度圖。色度圖可以視為 色彩空間的子集合(子空間)。
- 一個色度圖上所有顏色的亮度都一樣,不同色度 圖上的顏色差別僅在於亮度的變化。反過來說, 三度空間所能表現出的色彩一定比二度空間的多 ,二維色度圖相當於三維色彩空間的一個同亮度 的切面圖;二維色度圖表現不出明暗度的變化。
- ♥ 與亮度軸垂直的平面就是色度圖,所以色度圖上 沒有亮度的變化,而色度圖上有的變化就是色度 (chromaticity) •

▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 20

4.2.3 知覺色彩模式

♠ 介紹一個適合人來描述的色彩空間,叫做 IHS 色彩空間;/ 亮度 (intensity 或 brightness), H 色調或色相 (hue), S 飽和度 (saturation); 這 個色彩模式也有人稱為HIS 或HSI。

hue + saturation = chromaticity; thus intensity + chromaticity = color.



亮度 /.



色調 H.



飽和度 S.

- ₱ IHS 色彩空間又稱為"知覺色彩模式" (perceptual color model), 意思是指最符合人對 色彩的認知,也是最適合人來描述的一個色彩模 式。每一種色彩模式都可以轉換成該模式的 IHS 色彩模式。其實這個轉換的意義只是從直角座標 系統轉到圓柱座標系統 (cylindrical coordinate system) 而已(這個轉換是非線性轉換)。
- ◆ Z 軸愈高表示愈亮,愈低表示愈暗。半徑 r 愈長 表示愈飽和,愈短表示愈不飽合;模式外圍輪廓 上的顏色全都是完全飽和色 (飽和度100%),模 式中央線,也就是在 Z 軸上的點就表示完全不飽 和的點 (飽和度為0%)。旋轉角度 θ 從零開始, 依序表示色調變化紅、橙、黄、綠、藍、靛、紫

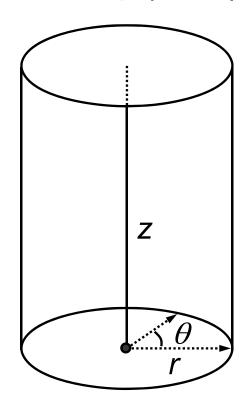


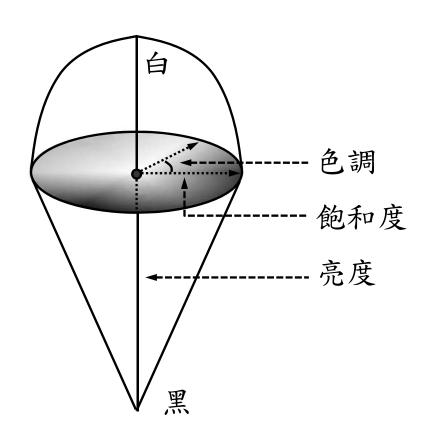
▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

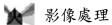
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 22

♥ IHS 色彩模式





I = z; $H = \theta$; S = r



🏶 理論上,亮度不影響色度 (色調加飽和度)。實際 視覺上,色度與亮度是有關係的。



下午1點



下午4點



(c) 下午5點。



(d) 下午6點。



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

4.3 色彩模式

◆ 在色彩科學的發展中,有許多色彩模式被提出:

CIE RGB

CIE XYZ(Yxy)

CIE Yuv (uvw, YUCV, UVW

CIE U* V* W*

CIE L* a* b*

CIE L* u* v*

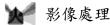
NTSC RGB

NTSC YIQ

NTSC Y CbCr

IHS, LHS, VHS

NTSC TV broadcasting CCIR-601 video standard perceptual color space



25

★ 上述每一種色彩模式都有三個變數或屬性 (attributes),其中 CIE 是國際照明協會 (Commission Internationale de L'Eclairage)的縮寫 (International Commission on Illumination); NTSC 是美國電視標準協會 (National Television Standards (Systems) Committee)的縮寫。美國、加拿大、日本、韓國、台灣的電視是採用 NTSC系統,大陸、新加坡、荷蘭等是採用 PAL系統。



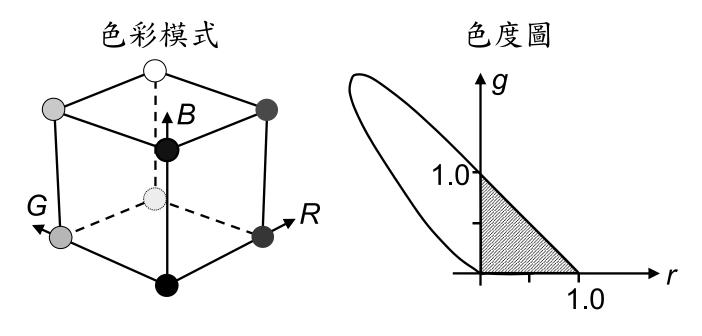
影像處理

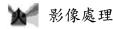
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 26

4.3.1 CIE RGB (1931)

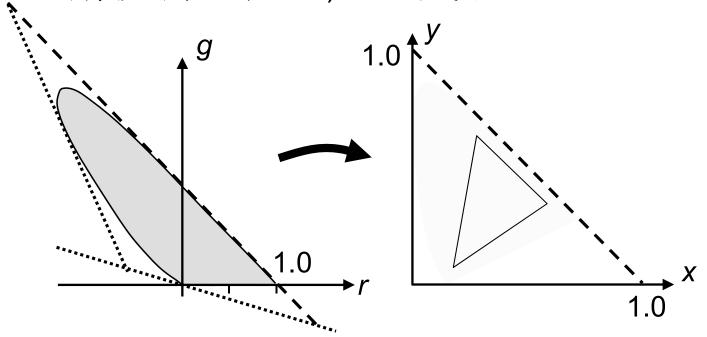
- R, G, B 為三種基本頻譜顏色
- 參考白 (reference white) 定義為 R = G = B = 1
- 有負的三激值 (negative tristimulus value)





4.3.2 CIE XYZ (1931)

◆ 為了去除 CIE RGB 表示式中的負成份, CIE 在 1931將 CIE RGB 做三維的線性轉換 (將色彩圖範 圍轉移到第一象限內),而變成了 CIE XYZ。



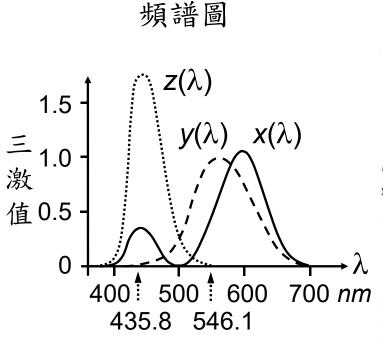
W .

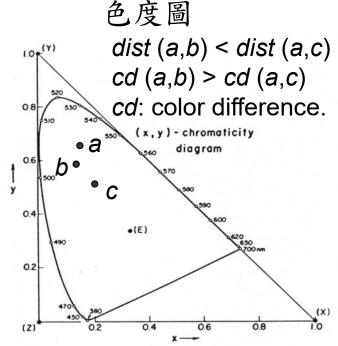
影像處理

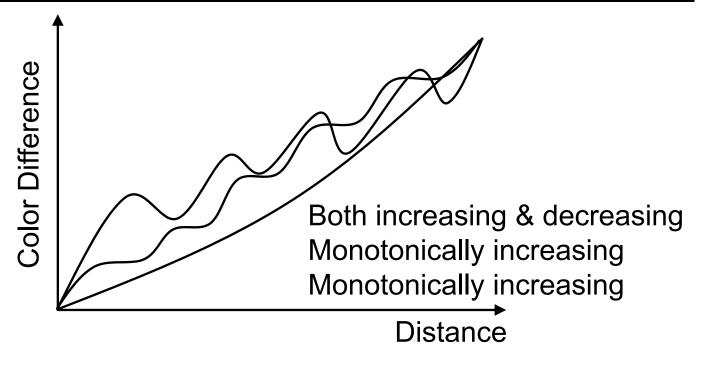
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 28

- Y = luminance, X = ?, Z = ? (無物理意義).
- 參考白:X=Y=Z=1.
- 這個色彩模式是從 RGB 色彩模式改進而來的, 以使得三激值的表示都變成正值。







Both increasing & decreasing $Dist(x_2) > Dist(x_1) \implies CD(x_2) \stackrel{>}{\underset{\sim}{=}} CD(x_1)$ Monotonically increasing $Dist(x_2) > Dist(x_1) \implies CD(x_2) \geq CD(x_1)$



影像處理

4. 色彩科學概要

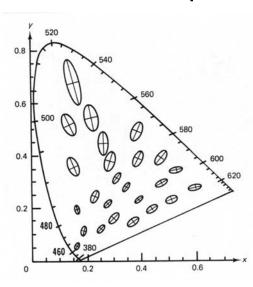
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 30

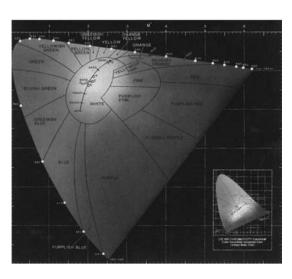
4.3.3 CIE Yuv (1960)

- CIE XYZ 雖然改進了CIE RGB 的負成份問題, 但仍然存在另一個問題。那就是色度圖上的距離 與眼睛所見的差異不一致。
- 曾任美國光學協會 (the Optical Society of America) 主席的麥克亞當 (Douglas L. MacAdam),在1942年曾找了數十人做實驗,判讀 xy 色度圖上的色彩差異。判讀的結果發現,聚集在某些橢圓區域內的顏色看起來幾乎都一樣,分辨不出差別,如下頁圖所示。這些看起來是相同顏色的橢圓區域就稱為麥克亞當橢圓 (MacAdam ellipses)。

- 影像處理
 - Y = luminance; u, v = chromaticities.
 - D 這個模式是從 XYZ 改進而來的,以達到均勻色度 尺度 (uniform chromaticity scale, UCS) 的特性.
 - 這是第一個均勻色度尺度的色彩模式,但其均勻 特性也僅在於 uv-plane 上而已。

MacAdam ellipses Yuv chromaticity diagram







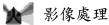
影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 32

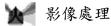
4.3.4 CIE U*V*W* (1964)

雖然稱 Yuv 是一個均勻色彩空間,但其實該均 匀性只定義在 UV 色度圖上 (平面) 而已,其均匀 性並沒包含亮度。因此在1964年, CIE 又發表 一個色彩標準U* V* W*,是一個在色度平面及亮 度軸所構成的三維空間中都是均勻度量的色彩空 間,W 形成亮度軸,UV形成色度平面,稱為 均勻色彩空間 (uniform color scale, UCS)



4.3.5 CIE L*u*v* (1976)

- ◆ 後來CIE 又覺得 U*V*W* 標準在使用上有些不理想的特性,所以在1976 年又提出 L* u* v* 及 L* a* b* 兩個色彩標準;這兩個色彩模式和 U* V* W* 一樣都是三維均勻度量的色彩空間。所有三維均勻度量的色彩空間,其屬性符號都有一個*(星號)。
- ♣ L* u* v* 是從 Yuv 轉出來的,適用於顯示器、 投影機的色彩表現。



4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 3

色彩模式 色度圖 $\frac{L^*}{100}$ 90 $\frac{V^*}{40}$ $\frac{V^*}{100}$ $\frac{1}{200}$ $\frac{1}{200}$



4.3.6 CIE L*a*b* (1976)

- ♣ L*a*b* 色彩空間的 L* 代表亮度,a* 用以改變 紅綠成份的平衡, b* 則用以改變黃藍成份的平 衡。a*及b*都不具視覺上的物理意義。
- ♣ L*a*b* 色彩模式能夠準確的量化表示孟歇爾系 統 (Munsell system),適用於印表機的色彩表現

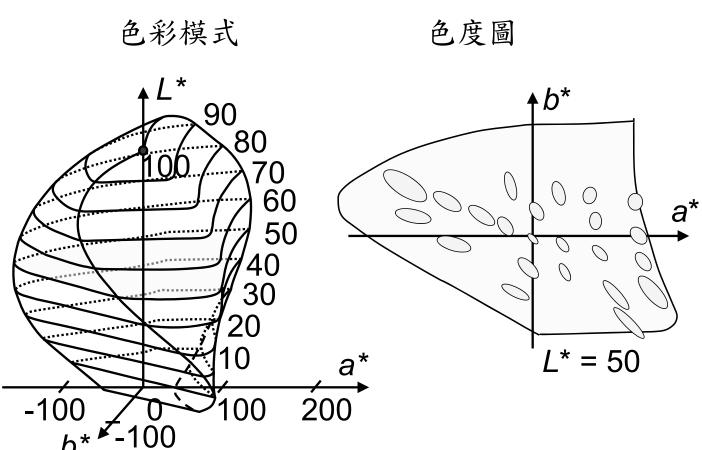


影像處理

4. 色彩科學概要

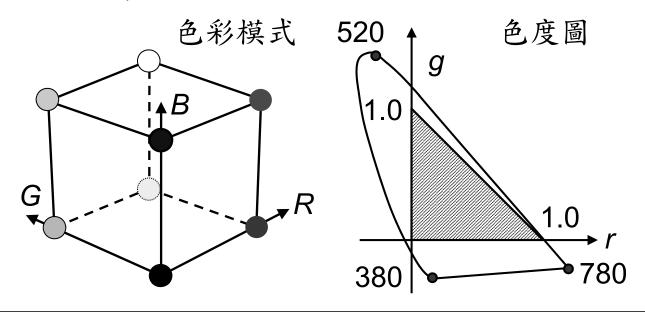
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

36



4.3.7 NTSC RGB

♠ NTSC RGB是美國電視標準協會 (NTSC) 為了 美國電視系統在1953年所制定的色彩標準;與 CIE RGB 相似;它們之間存在一個線性轉換關 係。參考白定義為:R=G=B=1。



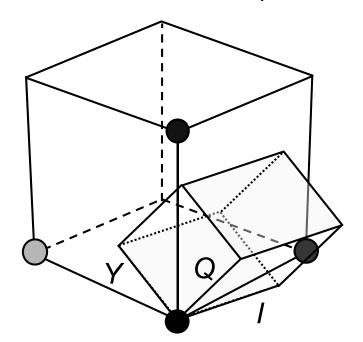
影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 38

4.3.8 NTSC YIQ (1953)

NTSC YIQ 是從NTSC RGB 經過線性轉換轉出 來的,NTSC RGB與NTSC YIQ的關係如下所 示 (YIQ 模型一樣是一個方塊)。



- ♥ YIQ 的目的完全是為了有限頻寬的電視所設計的 。RGB 的三成份同等重要,資料量很大。將 RGB轉換成YIQ,令Y有多種變化,I,Q量化成 較少種變化,則資料量就可以減少。所以 YIQ 具有資料縮減、編碼的意義。
- ❖ YIQ 的Y表示亮度,雖然 I, Q 個別稱為同相位 (inphase) 及相位差 (quadrature) 資料;/ 軸表示 沿著藍綠到橘色 (orange) 的色度 (chrominance) 變化,Q軸表示沿著黃綠到洋紅色 (magenta)的 色彩變化;但並沒有多少實際物理意義。



影像處理

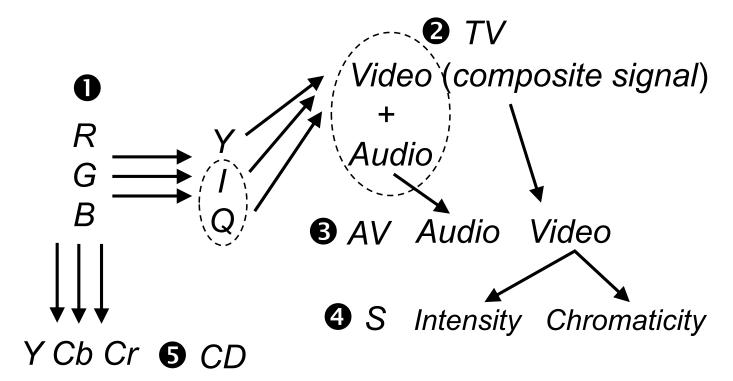
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

4.3.9 NTSC YCbCr

- ♥ 現在我們看傳統電視的電視信號仍YIQ 視訊資料 , 而且還加上聲音, 全部統合成一個訊號傳輸; 所以看傳統電視只要一條電纜線就夠了。後來設 備進步,視訊與音訊就分成獨立兩個信號,用兩 條電纜傳輸,就成了AV端子,A (audio) 是聲音 訊號, V (video) 就是 Y/Q 視訊。後來將視訊分成 亮度與色度 (chromaticity),稱為S端子;所以S 端子用了兩條線,個別傳輸亮度及色度資訊。
- 目前在相同資料量下,最好品質的視訊是 YCrCb ;其意義是把彩色資訊分解成三個訊號。YCrCb 也是從 NTSC RGB 經過線性轉換轉出來的。

🏶 視訊端子的發展歷史





影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 42

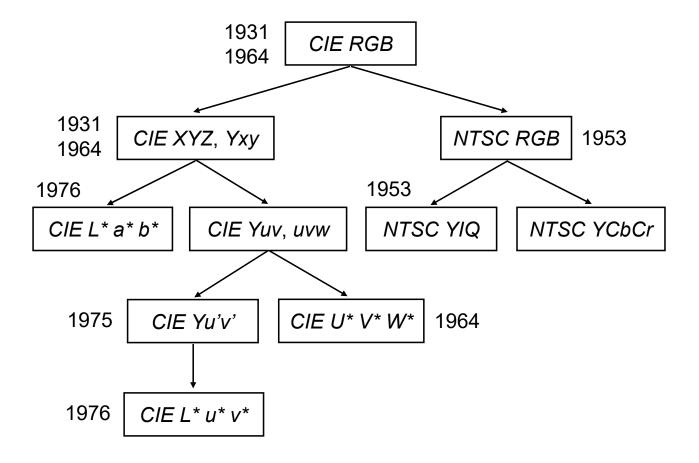
4.4 色彩轉換

● 色彩空間的轉換,包括一般色彩空間的轉換及知 覺色彩空間 (IHS) 的產生。

4.4.1 一般色彩空間轉換

● 上述各種色彩空間之間的轉換公式一起列述在本 小節。其中用矩陣乘法做轉換就一定是線性轉換 ,而有牽涉到UCS (uniform chromaticity scale or uniform color scale) 就一定是做非線性轉換。

🏶 各種色彩空間的轉換關係





▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

● 不同色彩空間的轉換公式 (1/3)

$$CIE \ XYZ \leftarrow CIE \ RGB$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.813 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$CIEXYZ \leftarrow NTSCRGB$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.29 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.117 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

 $NTSCYIQ \leftarrow NTSCRGB$ $[0.299 \ 0.587 \ 0.114]$ = 0.596 - 0.275 - 0.3210.212 - 0.523 0.311

 $NTSC RGB \leftarrow NTSC YIQ$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.621 \\ 1.000 & -0.273 & -0.647 \\ 1.000 & -1.104 & 1.701 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix}$$

 $CIE\ RGB \leftarrow NTSCRGB$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.167 & -0.146 & -0.151 \\ 0.114 & 0.753 & 0.159 \\ -0.001 & 0.059 & 1.128 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



➡ 不同色彩空間的轉換公式 (2/3)

$$\begin{array}{lll} \textit{YUV} \leftarrow \textit{NTSCRGB} & \textit{UVW} \leftarrow \textit{CIEXYZ} \\ = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.667 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ -0.500 & 1.500 & 0.500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$Yuv \leftarrow CIEXYZ$$

$$\begin{cases} Y = Y \\ u = 4X/(X + 15Y + 3Z) \\ v = 6Y/(X + 15Y + 3Z) \end{cases}$$

$$II^*V^*W^* \leftarrow Yuv$$

$$U^*V^*W^* \leftarrow Yuv$$

$$\begin{cases} W^* = 25(100Y/Y_0)^{1/3} - 17 \\ U^* = 13W^*(u - u_0) \\ V^* = 13W^*(v - v_0) \end{cases}$$

$$L^* a^* b^* \leftarrow CIE \ XYZ$$

$$\begin{cases} L^* = 25 (100Y/Y_o)^{1/3} - 16 \\ a^* = 500[(X/X_o)^{1/3} - (Y/Y_o)^{1/3} \\ b^* = 200[(Y/Y_o)^{1/3} - (Z/Z_o)^{1/3} \end{cases}.$$

$$L^* u^* v^* \leftarrow Yuv$$

$$\begin{cases} L^* = 25 (100 \, \text{Y} / \, \text{Y}_{\circ})^{1/3} - 16 \\ u^* = 13 \, L^* (u - u_{\circ}) \\ v^* = 13 \, L^* (1.5 v - v_{\circ}) \end{cases}$$



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 46

➡ 不同色彩空間的轉換公式 (3/3)

$$\begin{array}{c} \textit{YCbCr} \leftarrow \textit{NTSCRGB} & \textit{NTSCRGB} \leftarrow \textit{YCbCr} \\ \begin{bmatrix} \textit{Y} \\ \textit{Cb} \\ \textit{Cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.168 & -0.331 & 0.499 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \textit{R} \\ \textit{G} \\ \textit{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \textit{R} \\ \textit{G} \\ \textit{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.000 & -0.0009 & 1.4017 \\ 1.000 & -0.3443 & -0.7137 \\ 1.000 & 1.7753 & -0.0015 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \textit{Y} \\ \textit{Cb} \\ \textit{Cr} \end{bmatrix}$$

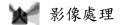
Other formulas

$$Y = 0.2990 (R - G) + G + 0.1140 (B - G)$$

 $Cb = 0.5643 (B - Y)$
 $Cr = 0.7133 (R - Y)$

 $YPbPr \leftarrow NTSCRGB$

$$\begin{bmatrix} Y \\ Pb \\ Pr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.1146 - 0.3854 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4542 - 0.0458 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \begin{cases} Y = 0.2126(R-G) + G + 0.0722(B-G) \\ Pb = 0.5389 (B-Y) \\ Pr = 0.6350 (R-Y) \end{cases}$$



4.4.2 知覺色彩空間的產生

- 知覺色彩空間的產生純粹是座標轉換的問題而 已。一般色彩空間都用直角(或非正交)座標系 統表示,知覺色彩空間則是以圓柱座標系統 (cylindrical coordinate system) 表示;所以知覺 色彩空間的產生大部份都是將直角座標系統轉 換成圓柱座標系統就可以了。
- # IHS of PAL YIQ

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix}_{PAL} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.11 \\ -0.147 - 0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{NTSC}$$

$$I = Y, \quad S = \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad H = tan^{-1}(Q/I).$$



影像處理

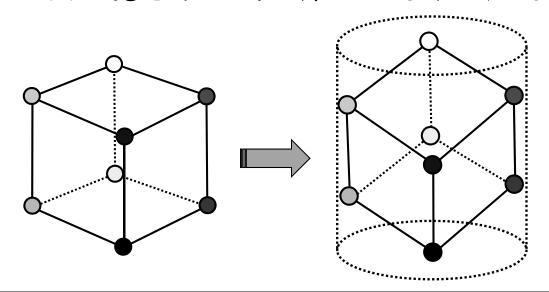
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

IHS of L*a*b*

$$I = L^*$$
, $S = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$, $H = tan^{-1}(b^*/a^*)$.

♣ 不過 RGB 色彩空間的 IHS 色彩空間轉換會很複 雜,因為 RGB 沒有任一軸表示亮度。所以 RGB與知覺色彩模式的轉換就變得比較複雜。





₩ 從 CIE RGB 到 IHS 的轉換公式

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[min(R, G, B)]$$

$$H = cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^{2} + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}$$
where $H = 360^{\circ} - H$, if $(B/I) > (G/I)$.



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室



If $0^{\circ} < H \le 120^{\circ}$, then

$$b = \frac{1}{3}(1-S), r = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{S\cos H}{\cos(60^{\circ} - H)}\right], g = 1 - (r + b).$$

If $120^{\circ} < H \le 240^{\circ}$, then

$$H = H - 120^{\circ}$$

$$r = \frac{1}{3}(1-S), g = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{S\cos H}{\cos(60^{\circ} - H)}\right], b = 1 - (r + g).$$

If $240^{\circ} < H \le 360^{\circ}$, then

$$H = H - 240^{\circ}$$

$$g = \frac{1}{3}(1-S), b = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^{\circ} - H)}\right], r = 1 - (g + b).$$

其中 R, G, B 的範圍都是 [0, 1] 但 r + g + b = 1; 我們可以用公式

R = 31r, G = 31g, and B = 31b, 將求出來的 rgb轉成 RGB,其中 1 是已知的 亮度 (intensity)。

這些色彩空間的 IHS 表示式也和他們的原始色 彩空間一樣;原來的色彩模式具有UCS 特性, 其轉換出來的 IHS 模式就有 UCS 的特性;原來 的色彩模式沒有UCS 的特性,其轉換出來的 IHS 模式也就沒有UCS 的特性。



▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

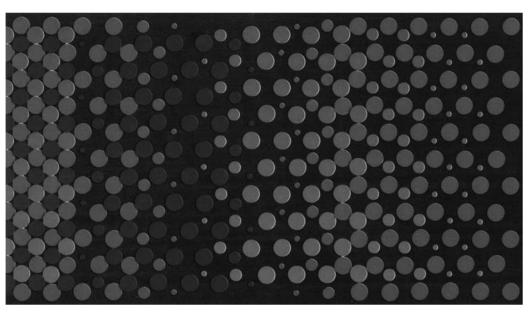
中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 52

4.5 色彩再製

- 色彩再製 (color reproduction) 的意義是指人以科 技的方法創造出各種顏色。人造的顯像設備都是 應用古典色彩科學的三原色理論來創造出各種顏 色的;三原色理論是說所有顏色都可以由三種基 本顏色依各種不同比率混合出來。
- ๊ 三種基本顏色 (primary colors): Red, Green, and Blue.
- ๊ 三種互補顏色 (complementary colors): Cyan, Magenta, and Yellow.



✿ 在主動光源的視訊設備上;例如,電視機、電腦 銀幕、投影機等,都是使用 RGB 來做為基本顏 色;但在反射光源的設備上;例如,彩色印表機 ,則是使用另一種基本顏色CMY來做為基本顏 色。





影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

4.5.1 色彩匹配的法則(Laws of color matching)

- (1)任何顏色都可由至多三種色光混合而成
- (2) 混合色的照度是為各組成色之照度的總和
- (3) 人眼無法分辨混合色光是由何種色光合成的
- (4) 在色彩匹配上,我們會忽略了亮度的變化, 而將不同亮度相同色度的顏色視為相同顏色, 其中顏色 = 照度 + 色度。
- (5) 色彩的加成性 (addition): $C_1 = D_1 \& C_2 = D_2 \implies \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2$

- (6) 色彩的相消性 (subtraction): $C_1 + C_2 = D_1 + D_2$ and $C_2 = D_2 \Rightarrow C_1 = D_1$
- (7) 色彩傳遞律 (transitive law): $C_1 = C_2$ and $C_2 = C_3 \Rightarrow C_1 = C_3$
- (8) 色彩匹配 (matching): $\alpha C = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3$ $\alpha C + \alpha_1 C_1 = \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3$ $\alpha C + \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 = \alpha_3 C_3$ 以上定律稱為 Grassman's 定律 (1853).

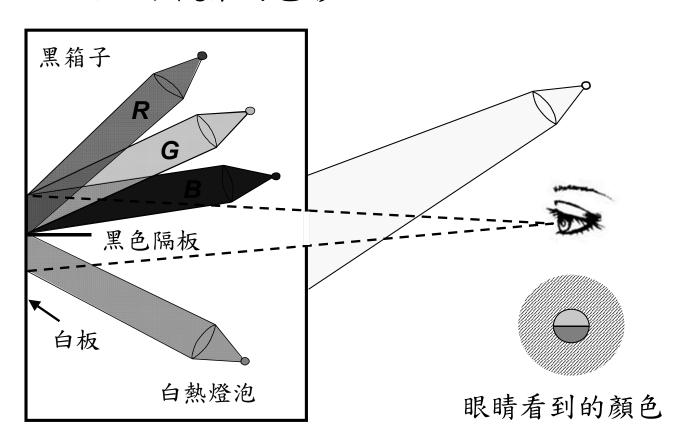


影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 56

4.5.2 由人眼觀察的色彩匹配



▶ 影像處理

4.5.3 透過計算的色彩匹配

♥ 假定三原色的光譜能量分佈為 $p_k(\lambda)$, k = 1, 2, 3

要匹配色彩 $C(\lambda)$, 三原色所需的比例為 β_k , k=1,2,

$$3$$
,则 $\sum_{k=1}^{3} \beta_k p_k(\lambda) = C(\lambda)$.

也就是第 i 種錐狀細胞對 C 色彩的反應 (response) 為

$$\alpha_{i}(C) = \int \left[\sum_{k=1}^{3} \beta_{k} p_{k}(\lambda)\right] S_{i}(\lambda) d\lambda$$

$$= \sum_{k=1}^{3} \beta_{k} \int S_{i}(\lambda) p_{k}(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

 $S_i(\lambda)$ is defined on page 23 of Ch.3



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 58

若第 i 種錐狀細胞對第 k 種單位原色的反應為

$$\alpha_{i,k} = \alpha_i(p_k) = \int S_i(\lambda) p_k(\lambda) d\lambda, \ i, k = 1, 2, 3.$$
 (3)

則

$$\alpha_i(C) = \int S_i(\lambda)C(\lambda)d\lambda = \sum_{k=1}^3 \beta_k \alpha_{i,k}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

這些公式稱為色彩匹配等式 (color matching equations)。



🏶 上述問題可定義為

給定一個任意的色彩頻譜分佈 $C(\lambda)$, 三原色能 量分佈 $p_{\nu}(\lambda)$, 及其頻譜曲線 (反應曲線 (sensitivity curve) $S_i(\lambda)$,則用三原色合成 C 色 彩所需的份量 β_k , k = 1, 2, 3 可由上述公式計算 出來。

也可以是給定一個 $C(\lambda)$ (或 $\alpha_i(C)$, i = 1, 2, 3), $p_k(\lambda)$,及 $S_i(\lambda)$,i,k=1,2,3,則用三原色合成 C 色彩所需的份量 β_k , k = 1, 2, 3 可由上述公式 計算出來。

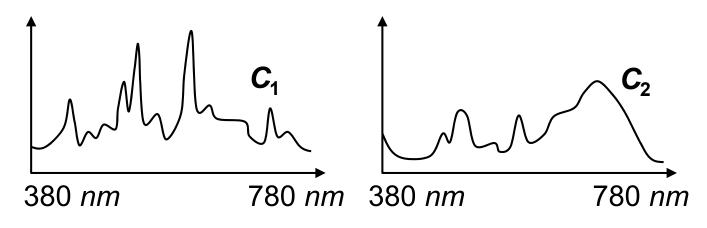


影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

● 眼睛看起來是相同的顏色,其組合的頻譜卻是 完全不同



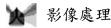
● 在實用上,三原色的基礎色源光是由參考白光調 整而得的;若此參考白光的能量分佈為已知 $W(\lambda)$ 。令 W_k 為用三原色合成 參考白光 (W) 所需 的份量, k = 1, 2, 3, 則定義

$$T_k(C) = \beta_k / w_k, \ k = 1, 2, 3.$$
 (5)

 $T_k(C)$ 其實就是色彩 C 的三激值 (tristimulus vaule)

注意:

- (1) 參考白的三激值就是 $T_1(W) = T_2(W) = T_3(W) = 1.$
- (2) 某色彩之三激值是其三原色相對於參考白三 原色的相對量 (relative amounts)。



4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

單一波長顏色的合成

譜波長為礼的三原色相對。也就是在公式 (4) 中, 令 $C(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda')$,再結合公式 (5),則可得到

$$\alpha_i(C(\lambda')) = \sum_{k=1}^3 w_k \alpha_{i,k} T_k(\lambda') S_i(\lambda'), i = 1, 2, 3.$$
 (6)

lacktriangle 單一波長的三激值 $T_{k}(\lambda)$ 與混合波長的三激值 $T_k(C)$ 之關係可由上述公式計算出

$$T_k(C) = \int C(\lambda) T_k(\lambda) d\lambda, \ k = 1, 2, 3. \tag{7}$$



● 範例

CIE 所定義出的三原色色彩,是由三個單調光源 所組成

Red
$$p_1(\lambda) = d(\lambda - \lambda_1), \lambda_1 = 700 \text{ nm}$$

Green
$$p_2(\lambda) = d(\lambda - \lambda_2)$$
, $\lambda_2 = 546.1 nm$

Blue
$$p_3(\lambda) = d(\lambda - \lambda_3), \lambda = 435.8 \ nm$$

這就是 CIE RGB 色彩模型。



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 6

由公式(3) 可得,

$$\alpha_{i, k} = S_i(\lambda_k), i, k = 1, 2, 3.$$
 (8)

CIE 標準白光源為一個平整的光譜分佈 (也就是 $W(\lambda) = 1$, $p_k(\lambda) = 1$, for k = 1, 2, 3.) 由公式 (4) 及公式 (8) 可得

$$\alpha_i(W) = \int S_i(\lambda) d\lambda = \sum_{k=1}^3 W_k S_i(\lambda_k), \quad i = 1, 2, 3.$$
 (9)

由公式 (9) 可得

$$w_1S_1(\lambda_1) + w_2S_1(\lambda_2) + w_3S_1(\lambda_3) = \int S_1(\lambda)d\lambda$$

 $w_1S_2(\lambda_1) + w_2S_2(\lambda_2) + w_3S_2(\lambda_3) = \int S_2(\lambda)d\lambda$
 $w_1S_3(\lambda_1) + w_2S_3(\lambda_2) + w_3S_3(\lambda_3) = \int S_3(\lambda)d\lambda$

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int S_1 \\ \int S_2 \\ \int S_3 \end{bmatrix}.$$

wk's 可由此非奇異公式 (nonsingular equations) 求得。



▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

接著由公式 (6) 可獲得

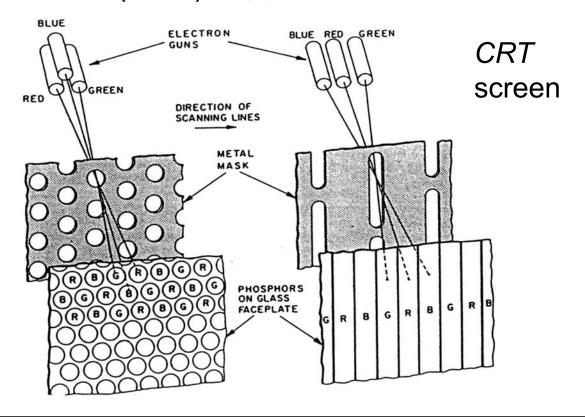
$$\begin{bmatrix} w_1S_1(\lambda_1) & w_2S_1(\lambda_2) & w_3S_1(\lambda_3) \\ w_1S_2(\lambda_1) & w_2S_2(\lambda_2) & w_3S_2(\lambda_3) \\ w_1S_3(\lambda_1) & w_2S_3(\lambda_2) & w_3S_3(\lambda_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(\lambda) \\ T_2(\lambda) \\ T_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix}.$$

透過已知的 W_k 's 及 $S_i(\lambda)$'s,即可得三激值 $T_k(\lambda)$, k=1, 2, 3. 這就是我們在第 18 頁所見的頻譜圖 資料。

₩ 影像處理

4.6 彩色螢幕 (Color screens)

♣ 陰極射線管 (CRT) 螢幕



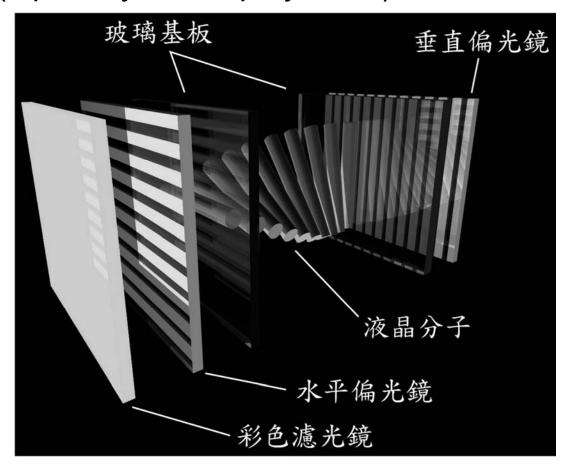


影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 6

● 液晶 (liquid crystal display, LCD) 螢幕



- ♣ 液晶面板結構層
 - 1. 彩色濾光鏡 (color filter)
 - 2. 偏光鏡 (Polarizing filter
 - 3. 玻璃基板 (Glass substrate) 加配向膜 (ITO electrodes)
 - 4. 轉向排列液晶層 (liquid crystal)
 - 5. 玻璃基板 (Glass substrate) 加配向膜 (ITO electrodes)
 - 6. 偏光鏡 (Polarizing filter)
 - 7. 發光面板 (light source)

影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 70

№ 液晶面板的彩色濾光片之色點排列 (1/3)

 R
 G
 B
 R
 G
 B

 R
 G
 B
 R
 G
 B

 R
 G
 B
 R
 G
 B

 R
 G
 B
 R
 G
 B

 R
 G
 B
 R
 G
 B

Vertical stripe.

 R
 G
 R
 G
 R
 G

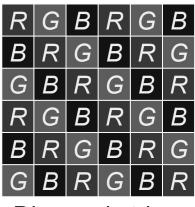
 W
 B
 W
 B
 W
 B

 R
 G
 R
 G
 R
 G

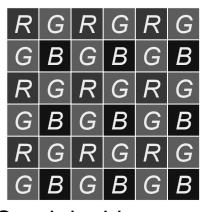
 W
 B
 W
 B
 W
 B

 W
 B
 W
 B
 W
 B

Quad with white.

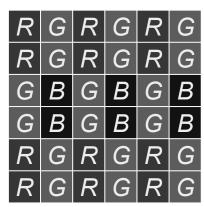


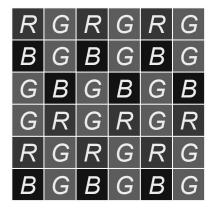
Diagonal stripe.



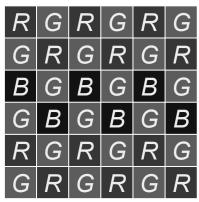
Quad double green.

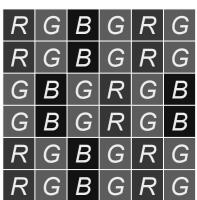
☆ 液晶面板的彩色濾光片之色點排列 (2/3)





Bayer array for interlace display. Modified Bayer array (I) for reducing Moire.





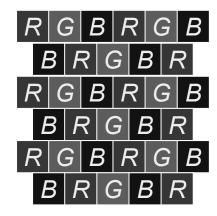
Modified Bayer array (II) for reducing Morie. Array for interlace display.

▶ 影像處理

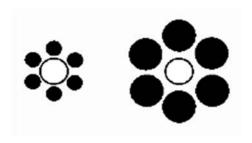
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 72

☆ 液晶面板的彩色濾光片之色點排列 (3/3)

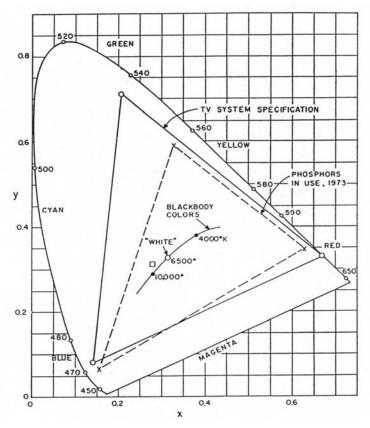


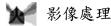
RGB delta triad.



色彩範圍 (color gamut)

不同的顯示設備擁有不同的色彩範圍。





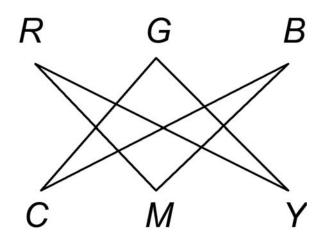
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

4.7 半色調列印 (Halftoning)

- 使用三種互補色: Cyan, Magenta, and Yellow.
- ♠ C: Cyan 靛色,由同份量的藍、綠兩色合成,
 - M: Magenta 洋紅色,由同份量的紅、藍合成
 - Y:Yellow 黄色,由同份量的紅、綠兩色合成。
- 若將紅藍綠三色等份量合成在一起就變成灰色 (gray);最高成份的灰色就是白色W,最低成份 的灰色就黑色。因此靛色就相當於白色減掉紅色 、洋紅色相當於白色減掉綠色、黃色相當於白色 減掉藍色

$$W ext{ (White)} = R + G + B$$
 $K ext{ (black)} = C + M + Y$
 $C = G + B ext{ } R = M + Y$
 $M = R + B ext{ } G = C + Y$
 $Y = R + G ext{ } B = C + M$





影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 76

$$\begin{cases}
C = W - R \\
M = W - G \\
Y = W - B
\end{cases}$$

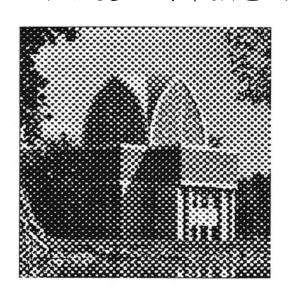
以正規化的 [0, 1] 數值表示為

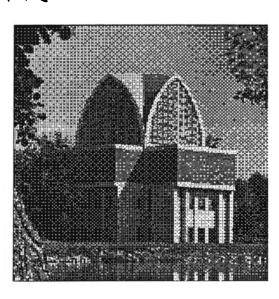
$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{if} \quad \begin{cases} R = W - C \\ G = W - M \\ B = W - Y \end{cases}$$

CMY 與 RGB 為互補色 (complementary colors)

$$R \stackrel{\underline{\underline{}}}{\longleftrightarrow} C$$
, $G \stackrel{\underline{\underline{}}}{\longleftrightarrow} M$, $B \stackrel{\underline{\underline{}}}{\longleftrightarrow} Y$

№ 影像列印在紙上與顯示在銀幕上的原理是完全不一樣的;顯示在銀幕上的每一個像素可以經由電壓控制,呈現不同的灰階;若加上彩色濾光片 (color filter),則可呈現各種顏色。但是紙上的列印,不管是噴墨還是雷射,每一個點的位置只能選擇印或不印,不能變化列印顏色的深淺。



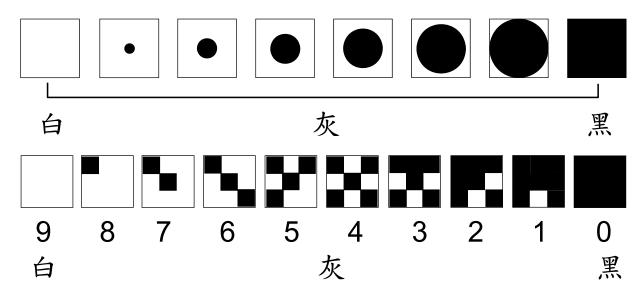


▶ 影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 78

● 所以要在紙上呈現各種黑白或彩色的色階變化,要有特殊的列印方式。我們可以在紙上設定一個像素大小的區域,定義為單位面積;在這個區域內列印各種面積大小不等的黑點 (black dot),如此就能以單位面積除以黑點面積表示該像素的灰階。這樣的列印技術稱為半色調技術 (halftoning technique)。

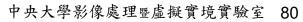


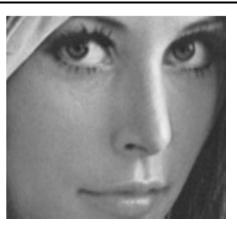
▶ 最通俗的半色調技術有: 色點模式 (dot pattern)、 誤差擴散 (error diffusion)、 順序抖動 (ordered dither)、及 色點抖動 (dot diffusion) 等四種。 每種方法各有其優缺點。



影像處理

4. 色彩科學概要





原始影像。



順序抖動。



誤差擴散。

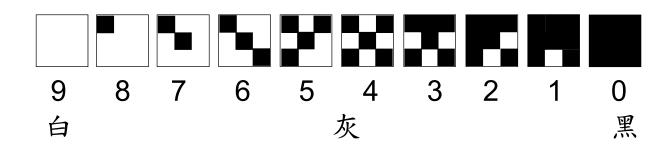


色點抖動。



4.7.1 色點模式

● 色點模式 (dot pattern) 的觀念最直接也最簡單,就是上一節所講的;假設每一印點的大小都一樣,以在單位面積內列印點數的不同來定義像素的灰階。 色點模式所列印的色階解析度就是依一個像素面積內能夠定義的最多點數來決定;一個像素固定為9個色點位置,所以可以定義10種色階。如果一個像素固定為n個色點位置,則可定義n+1種色階。



*

影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 82

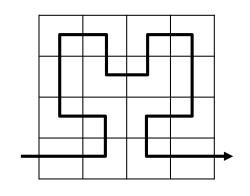
◆ 在一個像素的區域內,這些點的位置可以事先依我們的需要定義好,所以這個方法才稱為色點模式。 兩個最有名的色點模式:(i) 分散色點模式 (dispersed dot pattern);例如,Rylander 4×4 模式。 (ii) 集中色點模式 (clustered dot pattern);例如,Hilbert space filling curve

0	8	2	10
4	12	6	14
3	11	1	9
7	15	5	13

Rylander 4×4 分散色點模式

5	6	9	10
4	7	8	11
3	2	13	12
0	1	14	15

集中色點模式

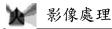


Hilbert space filling curve



4.7.2 誤差擴散

- □ 誤差擴散 (error diffusion) 演算法是由Floyd and Steinberg [] 在 1975年所提出的。這個演算法需要 處理相鄰像素間的灰階數值補償,所以計算量比較大。
- 這個演算法的基本原理是先定義一個門檻值;例如 ,256 灰階影像就用128當作門檻值,再以此門檻值 將灰階影像轉換成二值化影像 (binary image)。大於 門檻值的像素設為白點,否則為黑點。像素灰階不 為128 者,可算出一個正或負的差值 (稱為誤差), 這個差值將要分散給尚未列印的像素,以補償整張 影像整體灰階數值的變異,讓半色調影像 (二值化影 像)的灰階數值總和與原始影像相近。



4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 8

□ 誤差擴散演算法如下所述;假設影像灰階已正規化成 [0, 1],影像大小為 m×n,原始影像像素為 a,二值化影像像素為 b,灰階誤差為 err:

```
For i =1 to m do

For j =1 to n do

if a[i, j] < 1/2 then b[i, j] = 0 else b[i, j] = 1;

err = a[i, j] - b[i, j];

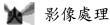
a[i, j+1] = a[i, j+1] + \alpha err;

a[i+1, j-1] = a[i+1, j-1] + \beta err;

a[i+1, j] = a[i+1, j] + \gamma err;

a[i+1, j+1] = a[i+1, j+1] + \delta err;

End
```



- ➡ 其中α,β,γ,δ是用來擴散誤差的常數;也就將誤差分 成不同份量,擴散給尚未列印的像素。
- 這些常數的大小通常是依據與產生誤差之像素的距 離成反比。Floyd and Steinberg 建議 (α,β,γ,δ) = (7/16, 3/16, 5/16, 1/16)。後來也有其他研究人員的 建議;例如,1976 年的Jarvis, Judice & Ninke 及 1981年的 Stucki 所建議的誤差擴散常數。

1			
16		•	7
16	3	5	1

1			•	7	5
48	3	5	7	5	თ
	1	3	5	3	1

1			•	8	4
42	2	4	8	4	2
	1	2	4	2	1

Floyd/Steinberg. Jarvis/Judice/Ninke. Stucki.

影像處理

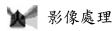
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室

86

4.7.3 順序抖動

- ♠ 順序抖動 (ordered dither) 法是1973年Eastman Kodak公司的Bryce E. Bayer [] 所創造的方法。
- 順序抖動法的觀念類似於色點模式法,只是手法看 起來有很大的不同。
- ◆ 使用順序抖動法前要先定義一個 n×n 抖動矩陣 (dither matrix)。想創造有較多色調的半色調影像,n 就要設大一點, n² 相當於半色調影像的色調數。
- 執行步驟是先定義好 n×n 抖動矩陣,再將灰階重新 量化成 [0, n²-1],接著將影像分割成一個個與抖動 矩陣一樣大小的區域,最後比較每一區塊中的像素 與抖動矩陣中相對應數值;像素灰階大於抖動矩陣 中相對應的數值,該位置輸出白點;否則輸出黑點



● 假設影像大小為 m×n,原始影像像素為 a,二值化 影像像素為 b;順序抖動演算法如下所述:

For
$$x$$
 =1 to m do
 For y =1 to n do
 $i = x \mod n$
 $j = y \mod n$
 if intensity of pixel $a(x, y) > D_{ij}$ then
 $b(x, y) = 1$
 else
 $b(x, y) = 0$
 End

其中 D_{ij} 是抖動矩陣 D 的第 (i, j) 個元素。



影像處理

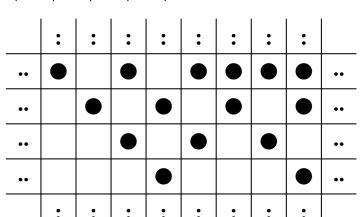
4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 {

₩ 順序抖動半色調法範例

•	:	•	•	•	:	:	:	
 2	7	10	8	8	11	13	14	
 5	8	11	12	9	15	14	15	
 2	3	5	6	8	10	8	6	
 0	5	6	9	7	3	5	6	
:		:		•	:	•	:	

0	8	2	10	0	8	2	10
12	4	14	6	12	4	14	6
3	11	1	9	3	11	1	9
15	7	13	5	15	7	13	5





4.7.4 色點抖動

● 色點抖動 (dot diffusion) 方法是由電腦科學大師 Donald Ervin Knuth 在1987所創的方法;這個方法保留了誤差擴散法的銳利性 (sharpness) 及順序抖動半色調法的平行性 (parallelism)。所以色點抖動法就同時具備了誤差擴散及順序抖動方法的步驟。首先定義半色調影像的灰階數k及抖動矩陣,再將影像分割成一個個與抖動矩陣一樣大小的區域;Knuth 使用64灰階,所以抖動矩陣就是8×8。



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 90

● 假設原始影像像素為 a, 二值化影像像素為 b; 色點 抖動演算法如下所示:

```
For k = 0 to 63

for all (i, j) of class k do

if a[i, j] < 1/2 then b[i, j] = 0 else b[i, j] = 1;

err = a[i, j] - b[i, j];

w = 0;

for all neighbors (u, v) of (i, j) do

if class(u, v) > k then w = w + \text{weight } (u-i, v-j);

if w > 0 then for all neighbors (u, v) of (i, j) do

a[u, v] = a[u, v] + err weight (u-i, v-j) / w.
```

End

4.7.5 比較

- 各種半色調法各有優缺點,其中主要的缺點有:
 - 輸出的半色調影像變模糊 (blurred) 了、
 - ii. 有鬼影現象 (ghost phenomenon) 產生、
 - iii. 影像對比 (contrast) 變差了、
 - iv. 產生假邊 (false contour)、
 - V. 產生不可預期的紋理 (texture pattern)、.等。
- 🗬 四種半色調演算法的優缺點:

演算法	模糊	鬼影	對比	假邊	紋理
色點模式	會	無	變差	有	無
誤差擴散	不會	有	變差	無	有
順序抖動	會	無	變差	有	有
色點抖動	會	有	沒影響	無	有



影像處理

4. 色彩科學概要

中央大學影像處理暨虛擬實境實驗室 92

4.7.6 其他半色調方法

● 除了上述四種傳統的半色調演算法外,還有許多後 來發展的新半色調技術; 例如,

頻率調變顯示 (frequency modulation screening)、 適應性抖動 (adaptive dithering)、

模組式半色調 (model-based halftoning)、

- .. 等。後來所發展的技術著重在:
- i. 改進列印品質、
- ii. 精確色彩列印、
- iii. 改進列印速度、
- iv. 重建連續色調 (continue-tone) 影像、
- V. 半色調影像編碼壓縮、.. 等。